

В.А. Логоминов, А.И. Гермашев, В.А. Кришталь
Ю.Н. Внуков, д-р техн. наук, Запорожье, Украина

О ХАРАКТЕРИСТИКЕ ЖЕСТКОСТИ ДЛЯ ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ ТИПА «ЗАЩЕМЛЕННОЙ ПЛАСТИНЫ»

Розглянуті питання термінології щодо характеристики жорсткості тонкостінних деталей типу «затиснених пластин». Розглянуті фактори, що впливають на їх жорсткість. Показано відмінність понять «нежорстка» та «маложорстка» деталь. Запропоновано використовувати поняття «тонкостінна» для деталей типу «затиснених пластин». Показаний зв'язок між характеристиками, що впливають на жорсткість деталі, та її частотою власних коливань. В якості прикладу тонкостінних деталей типу «затиснених пластин» розглянуті лопатки осевих моноколес авіаційних газотурбінних двигунів.

Рассмотрены вопросы терминологии для характеристики жесткости тонкостенных деталей типа «затисненных пластин». Рассмотрены факторы, влияющие на их жесткость. Показано отличие понятий «нежесткая» и «маложесткая» деталь. Предложено использовать понятие «тонкостенная» для деталей типа «затисненных пластин». Показана связь между характеристиками, влияющими на жесткость детали, и частотой ее собственных колебаний. В качестве примера тонкостенных деталей типа «затисненных» рассмотрены лопатки осевых моноколес авиационных газотурбинных двигателей.

The problems of terminology to describe the stiffness of thin-walled workpieces called "clamped plate". The factors influencing their stiffness are considered. Difference of terms of "nonrigid" and "flexible" workpiece is disclosed. The term "thin-walled" is proposed to use for the workpieces called "clamped plates". The relationship between the characteristics influencing the stiffness of the workpiece and the frequency of their natural oscillations is disclosed. As an example thin-walled parts of the "clamped plate" axial blisk of gas-turbine aero-engine is considered.

Анализ большого числа диссертационных работ, монографий и статей выявил неоднозначность трактовки понятия жесткости для тонкостенных обрабатываемых деталей. Например, Куклев [1] пишет: «по геометрической форме, размерам, значению модуля упругости материалов и схеме нагружения различают категории массивных и нежестких деталей». Массивными он называет конструкции деталей, габаритные размеры которых равны или мало отличаются друг от друга, идеальными являются детали симметричной формы – куб или шар. К нежестким конструкциям он относит детали с различными размерами поперечных сечений $A \times B$, длин l , толщин стенок t и высот H . Нежесткость конструкции деталей описывает количественным соотношением размеров. Так, например, нежесткие круглые пластины имеют $H \leq (0,2-0,3)D$, гладкие и ступенчатые валы – $l \geq 15D$, трубчатые детали – $t \leq 0,05D$ [2]. Предпринимались попытки классифицировать детали по четырем категориям жесткости: очень жесткие (массивные), повышенной, средней и малой жесткости [3].

За более полный критерий нежесткости также предлагалось принять несущую способность конструкции детали [1], которая является функцией их размеров, геометрических характеристик поперечного сечения и расчетного сопротивления нагрузкам. Такая неопределенность понятия **нежесткость не-массивных деталей** привела к тому, что в одних работах тонкостенные детали называют нежесткими [1, 4, 5, 6], а в других – маложесткими (но все-таки жесткими) [7, 8, 9].

По нашему мнению методической основой для разработки классификации по жесткости тонкостенных деталей высокой точности может быть принята количественная взаимосвязь жесткости и массы, предложенная В.И. Журавлевым [10]. Действительно, в современном машиностроении весьма часто прибегают к тонкостенным конструкциям обеспечивающим высокую жесткость и прочность при сравнительно небольшом весе.

ГОСТом 30987-2003 «Основные нормы взаимозаменяемости. Назначение размеров и допусков для нежестких деталей» дается однозначное определение нежесткой детали [11]. В нем указано, что нежесткой называется деталь, которая деформируется до такой степени, что в свободном состоянии выходит за пределы допусков размеров и (или) формы и расположения, относящихся к детали в закрепленном состоянии. Причем под свободным понимается состояние детали на которую воздействует только сила тяжести.

Рассмотрим применение условия нежесткости для случая, когда обрабатываемая деталь является тонкостенной защемленной пластиной. На рис. 1 приведена схема нагружения защемленной балки с размерами: L – вылет, h – высота, B – ширина, нагруженной равномерно распределенными силами собственного веса, где величина прогиба определяется формулой (1) [12].

$$f = \frac{q \cdot L}{8 \cdot EJ_x} \text{ при } z = 0. \quad (1)$$

В этой формуле учтены все характеристики детали, которые отвечают за её жесткость, – как способность сопротивляться образованию деформации в виде её прогиба.

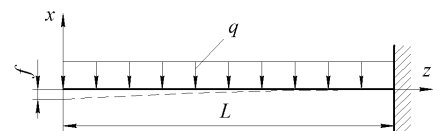


Рисунок 1 – Схема нагружения защемленной балки силами собственного веса

Рассмотрим влияние всех составляющих формулы (1) на величину прогиба, под действием собственного веса.

q – интенсивность нагрузки определяется величиной массы пластины, приходящейся на единицу ее длины [Н/м]. Другими словами $q = g \cdot \rho \cdot B \cdot h$, где g – ускорение свободного падения [м/с²], ρ – плотность материала [кг/м³]. Уменьшить q можно уменьшением плотности материала ρ или уменьшив площадь поперечного сечения $F = B \cdot h$. Однако уменьшение площади сечения значительно уменьшает величину момента инерции сечения $J_x = \frac{B \cdot h^3}{12}$,

причем снижение толщины пластины h влияет очень значительно.

l – вылет пластины влияет на величину прогиба очень сильно. С увеличением вылета прогиб увеличивается, т.е. жесткость пластины резко снижается.

E – модуль упругости, является физической константой материала пластины [Па], поэтому, чем выше значение E , тем меньше будет прогиб пластины и выше ее жесткость.

J – момент инерции сечения детали относительно главной оси перпендикулярной к плоскости изгибающего момента [м⁴]. Момент инерции характеризует форму и расположение площади сечения детали относительно центральной оси, в которой статический момент равен нулю. Для тонкостенных деталей это чрезвычайно важная характеристика, т.к. для снижения прогиба необходимо увеличивать момент инерции, что может быть достигнуто, если площадь сечения расположить подальше от центральной оси, т.е. центра тяжести сечения.

На рис. 2 приведены две одинаковые по площади, но различных по форме поперечные сечения пластины. Расчеты показывают, что форма сечения может существенным образом изменить момент инерции тонкостенных пластин и как следствие их жесткость. Момент инерции плоских сечений, показанных на рис. 2а и б определяется по формулам [12]:

$$I_{xa} = \frac{B \cdot h^3}{12}, \quad (2)$$

$$I_{xb} = \frac{h \cdot R^3}{2} \left(2\alpha + \sin 2\alpha - \frac{4\sin^2 \alpha}{\alpha} \right), \quad (3)$$

где R – радиус кривизны [м].

Угол α можно определить из соотношения $\alpha = \frac{B}{2R}$ [рад].

На рис. 2в приведен график зависимости соотношения моментов инерции плоских сечений $\frac{I_{xb}}{I_{xa}}$ в зависимости от радиуса кривизны R при $B = 20$ мм и $h = 1$ мм.

213

Из рис. 2в видно, что уменьшение радиуса кривизны поперечного сечения пластины (одинакового размера по высоте и ширине) в несколько раз может увеличивать величину момента инерции и как следствие в несколько раз увеличивать жесткость (т.е. уменьшать величину ее прогиба).

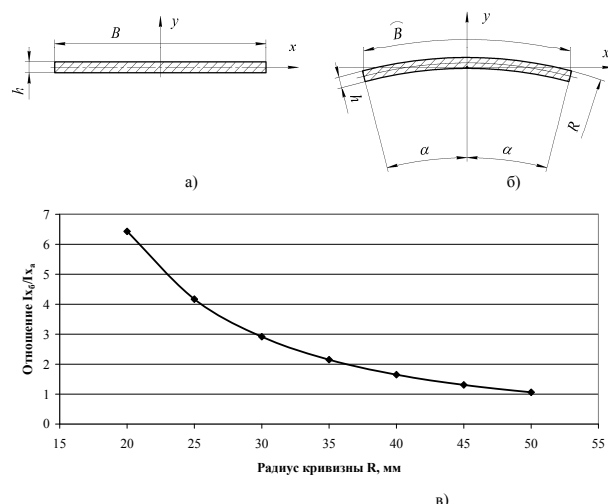


Рисунок 2 – Влияние формы поперечного сечения пластины, имеющих одинаковую площадь, на момент инерции ($I_{xa} < I_{xb}$)

Анализ формулы (1) позволяет одновременно с учетом веса, вылета, геометрических размеров и формы поперечного сечения, а также физических характеристик упругости материала детали установить уровень ее жесткости как свойства конструкции сопротивляться упругому деформированию.

Таким образом, тонкостенные детали типа «защемленных пластин» могут быть как нежесткими, так и очень жесткими, в зависимости от сочетания всех параметров, входящих в формулу (1).

При механической обработке тонкостенных деталей часто возникают проблемы, связанные с появлением вибраций. Одной из основных характери-

214

стик упругой системы детали является частота ее собственных колебаний, которую необходимо определить для разработки рекомендаций по устранению вибраций.

Ниже приведена формула (4) для определения частоты собственных колебаний упругой системы детали типа «защемленной пластины» [13].

$$\omega = \sqrt{\frac{A \cdot E \cdot I_x}{l^3 \cdot m}}, \quad [1/c] \quad (4)$$

где ω – круговая частота собственных колебаний.

A – коэффициент, учитывающий особенности конструкции упругой системы;

E – модуль упругости [Па];

l – вылет пластины [м];

m – масса пластины [кг];

Сравнение формул (1) и (2) показывает очевидную общеизвестную связь жесткости с величиной частоты собственных колебаний упругой системы детали, так как в эти формулы входят одни и те же составляющие.

Таким образом, все характеристики, уменьшающие деформацию детали под действием только сил тяжести и повышающие ее жесткость, приводят к увеличению частоты собственных колебаний ее упругой системы.

Другими словами если частота собственных колебаний упругой системы детали достаточно высокая, то можно утверждать, что деталь достаточно жесткая.

Примером тонкостенной и одновременно жесткой детали типа «защемленной пластины» может служить лопатка моноколеса компрессора газотурбинного двигателя (ГТД).

На рис. 3а показан общий вид осевого моноколеса, а на рис. 3б дан эскиз лопатки моноколеса с размерами, которые указаны в таблице. На рис. 4а приведен общий вид центробежного моноколеса (ЦБК), а на рис. 4б – эскиз лопатки с размерами.

В таблице приведены частоты собственных колебаний лопаток осевых и центробежных моноколес, которые представляют собой детали типа «защемленных пластин».

Высокий уровень собственных частот позволяет утверждать, что данные детали можно рассматривать как тонкостенные с высокой жесткостью.

Более того, анализ методики расчета на прочность рабочей лопатки компрессора [14] показывает, что допущения, принимаемые для расчетных схем, предполагают лопатку рассматривать как жесткую, консольно закрепленную балку, а ее деформацией под действием сил и моментов пренебрегают.

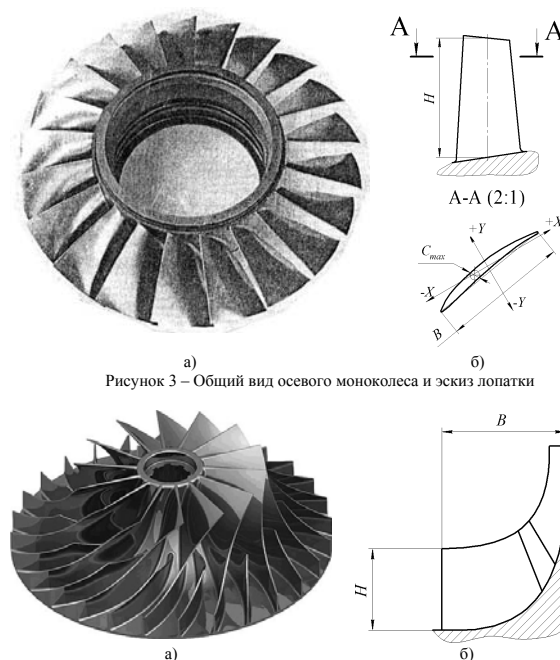


Рисунок 3 – Общий вид осевого моноколеса и эскиз лопатки

Рисунок 4 – Общий вид центробежного моноколеса и эскиз лопатки

Таблица – Частоты собственных колебаний лопаток моноколес

Модель ГТД	Размеры лопатки Н×В×С _{max} , мм	Частоты собственных колебаний лопаток, Гц
Д-27, 1-я ступень	128×(95...106)×(2,7...5,9)	345-380
Д-27, 2-я ступень	нет данных	390-460

215

216

	АИ-222, 1-я ступень	162×(116...120)×(2,8...10,4)	293-310
	АИ-222, 2-я ступень	108×(74...80)×(2,1...3,9)	255-280
ЦБК	АИ-450МС [15]	38×58×(1,2...1,8)	2775-2905

Таким образом, при изучении особенностей механической обработки деталей типа «защелочной пластины» использование термина «нежесткой» или «маложесткой» детали должно быть обоснованным. В случае исследований технологических процессов механической обработки лопаток моноколес ГТД, точнее использовать термин «тонкостенная» деталь

Список литературы: 1. Куклев, Л.С. Оснастка для обработки нежестких деталей высокой точности [Текст] / Л.С. Куклев, М.М. Тазетдинов. – М.: Машиностроение, 1978. – 104 с.: ил. 2. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов [Текст] / Кован В. М., Корсаков В. С., Косилова А. Г., Калинин М. А.; ред. Корсакова В. С. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Машиностроение, 1977. – 415 с. 3. Проблемы развития технологии машиностроения [Текст] / Под ред. Сателля Э.А. – М.: Машиностроение, 1968. – 592 с. 4. Егоров, Е.С. Повышение эффективности процессов обработки нежестких деталей инструментом из композитов с применением магнитной технологической оснастки [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Егоров Е. С. – Чита, 2004. – 161 с. 5. Якин, С.А. Устойчивость обработки нежестких заготовок на фрезерных станках [Электронный ресурс]: Дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Якин С. А. – Ульяновск, 2005. – 136 с. Режим доступа: <http://diss.rsl.ru/diss/05/0777/050777010.pdf>. 6. Калафатова, Л.П. Влияние конструктивных особенностей нежестких корпусных деталей на изменение их динамической жесткости при механической обработке / Калафатова, Л.П., С.А. Погз // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 92. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – 124 с. 7. Сергеев, А.В. Повышение стабильности и точности формы маложестких осесимметричных деталей путем автоматического управления положением инструмента [Электронный ресурс]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Сергеев А.В. – Тольятти, 2005. – 165 с. Режим доступа: <http://diss.rsl.ru/diss/05/0504/050504017.pdf>. 8. Долгов, В.В. Программирование формообразующих траекторий на станках с ЧПУ при обработке маложестких деталей [Электронный ресурс]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Долгов В.В. – Ростов-на-Дону, 2002. – 165 с. Режим доступа: <http://diss.rsl.ru/diss/02/0005/020005012.pdf>. 9. Лицов, А.Е. Разработка расчетного метода определения технологических условий конечного фрезерования маложестких сложно-профильных деталей с учетом их деформаций [Электронный ресурс]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Лицов А.Е. – М.: РГБ, 2005. – 156 с. Режим доступа: <http://diss.rsl.ru/diss/05/0518/050518026.pdf>. 10. Журавлев, В. Н. Снижение веса машиностроительных конструкций. 2-е изд., перераб. и доп. / В. Н. Журавлев. – Свердловск, Машгиз. 1961. – 239 с. 11. ГОСТ 30987–2003. Основные нормы взаимозаменяемости. Назначение размеров и допусков для нежестких деталей [Текст]. – Введ. 2005–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 6 с. 12. Справочник по сопротивлению материалов [Текст] / Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.; отв. ред. Писаренко Г. С. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с. 13. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов [Текст] / В.И. Феодосьев. – М.: Наука, 1973. – 544 с. 14. Шошин, Ю.С. Расчет на прочность рабочей лопатки компрессора или турбины. Учебное пособие / Ю.С. Шошин, С.В. Епифанов, С.Ю. Шарков. – Харьков: Харьковский авиационный институт, 2006. – 28 с. 15. Пухальська, Г.В. Забезпечення частот власних коливань у виробництві відцентрових коліс / Г.В. Пухальська, Г.В. Карась, В.В. Голощапова, Т.О. Панченко // Вестник двигателестроения. – 2012. - №1. – С. 121-127.

Поступила в редакцию 15.06.2012